論文

ひずみ速度感受性の温度依存性を考慮した 超塑性ダイレスチューブ引抜き熱-変形連成 FEM 解析

古島 剛* 真鍋 健一*

Finite Element Simulation with Coupled Thermo-mechanical Analysis of Superplastic Dieless Tube Drawing Considering Strain Rate Sensitivity

Tsuyoshi FURUSHIMA* and Ken-ichi MANABE*

(Received on April 25, 2006)

The deformation behavior in superplastic dieless tube drawing is studied numerically by the finite element method (FEM). The FEM with coupled thermo-mechanical analysis is conducted considering strain rate sensitivity to clarify the effect of dieless tube drawing conditions such as tensile speed and material properties on the deformation behavior of the tube. In the calculation, the material properties were dealt with as a function of temperature in a special subroutine, whose constitutive equation considering strain rate sensitivity and strain hardening was used, and was linked to the solver. FEM results for both heat transfer and the deformation profile are in good agreement with experimental results. Therefore, the validity of FE modeling of superplastic dieless drawing is demonstrated. In addition, the effect of material properties m and n values on the deformation profile is demonstrated numerically. As a result, a higher m value constrains the local instability deformation. In cases where the m value is high, the n value has little effect on the deformation profile. Consequently, it is found that analysis considering strain rate sensitivity is important for the prediction of the deformation profile in the dieless drawing process.

Key words: dieless tube drawing, finite element method, strain rate sensitivity, heat transfer

1. 緒言

近年、超微細かつ高精密な部材加工品の製造は、医療、通信、バイオ、計測に関連する機器の高性能化を先導し、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の発展を促している。特に超微細なマイクロチューブは構造・機構部品として冷却用マイクロノズルや放電加工用電極管、コンタクトプローブ、無痛注射針¹⁾など、多種多様な用途をもつ素材の一つとして期待されている。

筆者らは、マイクロチューブの創成プロセスとして超塑性ダイレス引抜きを提案し、マイクロスケールにおいて様々な弊害をもたらす微細金型を用いることなく、内外径比を維持したまま外径 $D=343\mu\text{m}$ 、内径 $d=161\mu\text{m}$ のマイクロチューブの創成に成功し、本プロセスの有効性を実証した²⁾。また引抜き加工条件が変形形状に及ぼす影響について基礎的検討を行った。

しかしながら、各加工条件、材料特性の影響を実験的に調べる場合、広範囲にわたる各因子の独立した影響を調査することには限界がある。またマイクロスケールでの加工であるため、引抜き中におけるチューブの変形挙動を実験的に詳細に観察することが非常に困難である。そのため既報²⁾の実験では詳細な検討が不十分であり、解析的な検討が必要であると考えられる。

ダイレス引抜きに関する解析的検討として、小畠³⁾はダイレス引抜きの変形形状を実験的に求め、得られた形状をもとに

熱伝導を考慮した有限要素法の(以後、FEM と記す)解析を行っている。その結果、軸方向の温度分布が実験結果と良い一致を示し、解析の有効性を示している。しかしながら、解析は熱伝導のみを考慮し、変形を取り扱っていないため、各因子が変形形状に及ぼす影響に関しては検討していない。また Wang ら⁴⁾はエネルギー原理をもとに定常状態におけるダイレス引抜きの引抜き力を解析し、引抜き力に及ぼす種々の因子の影響を調査している。しかしながら、熱伝達の影響や非定常状態中の変形挙動を考慮しておらず十分な解析が行われていないのが現状である。また筆者らはこれまでにチューブ内部の熱伝導を考慮したダイレス引抜き熱-変形連成 FEM 解析を行ってきた⁵⁾。しかしながら、これまでのモデルでは、加熱・冷却温度及び加熱冷却間距離を予め設定し、チューブ表面部の温度分布を既定する必要があった。実際には加熱コイル直下において供給される熱量と冷却コイルおよび大気との熱伝達によって温度分布は決定されるべきであり、チューブ表面の温度分布は既知のものではないはずである。そのため、従来のモデルでは加熱コイルからの供給熱量や冷却コイルの冷却効率などの因子が温度分布に及ぼす影響を検討するには不十分であった。

そこで本報では、加熱コイルにおける供給熱量及び冷却コイルと大気との熱伝達を考慮した新たな熱伝達モデルを作成した。チューブはひずみ速度感受性及びひずみ硬化依存性、さらにそれらの温度依存性を考慮した材料をモデル化し、チューブ表面での熱伝達及びチューブ内部の熱伝導とチューブ

* 首都大学東京大学院工学研究科 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

の変形解析を連成させた超塑性ダイレス引抜き熱変形連成 FEM 解析を行った。具体的には既報で用いた Al-78Zn 超塑性合金のダイレス引抜き解析を行い、解析結果と既報²⁾の実験結果を比較し、本解析の有効性を示した上で、引抜き挙動に及ぼす因子の影響について調査を行った。特に加工条件及び材料特性が変形形状に及ぼす影響について、実験では詳しく究明できない点を解析的に調査した。

2. 超塑性ダイレス引抜き

超塑性ダイレス引抜きは、Fig. 1 に示すように超塑性合金管の一端を固定し、一部を加熱し、素材の他端を速度 V_1 で引張り、同時に加熱変形領域を速度 V_2 で移動させることによりチューブを細管化させる加工法である。チューブの変形前後の断面積をそれぞれ A_1 , A_2 とすると、所望の断面減少率 r は次式から求めることができる⁶⁾。

$$r = 1 - \frac{A_2}{A_1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (1)$$

素管に巨大な延性を有する超塑性材料を用いることによって、大きな断面減少率を得ることが可能である。

3. 超塑性ダイレス引抜きの FEM 解析

3.1 超塑性ダイレス引抜き FEM モデル

超塑性ダイレス引抜き解析を行うための汎用有限要素法コードは MSC.Marc/Mentat ver.2001 を用いた。加工中のチューブの温度変化および変形を考慮した熱変形連成剛塑性有限要素解析を行った。解析モデルは Fig. 2 に示すような軸対称モデルとした。チューブの寸法は既報²⁾で述べた実験と同様に外径 $D=2\text{mm}$ 、内径 $d=1\text{mm}$ である。またチューブの長さは $l=50\text{mm}$ とした。要素の分割数は軸方向に 500、肉厚方向に 4 とし、要素の種類は 4 節点軸対称要素を用いた。チューブの左端を拘束し、右端に引張速度 V_1 を与えてチューブに引張変形を加えた。

3.2 熱伝達モデル

ダイレス引抜き加工中のチューブの温度分布は、加熱コイルによって供給される熱量、チューブ内の熱伝導、冷却コイルによる冷却風および大気への熱伝達によって変化する。これらの影響を考慮して解析を行わなければならない。これらの因子を考慮した軸対称における非定常状態の熱伝導方程式は以下のように表される。

$$\lambda \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{Q} = 0 \quad (2)$$

ここで λ : 熱伝導率, c : 比熱, ρ : 密度, $\dot{Q}$: 単位時間・単位体積あたりの熱発生量である。

チューブは、加熱コイルから供給される熱量によって温められ、冷却コイルによる冷却風および大気によって冷やされる。そこで本解析では、チューブ境界面での熱伝達に関する境界条件を Fig. 3 に示すように与えた。これらの境界面では、熱伝達によって熱の移動が起こり、次式の境界条件が成り立つ。

(a) 加熱コイル内の熱伝達

チューブ表面では加熱コイル内で局所的な加熱による熱の移動が起こり、次式の境界条件が成り立つ。

Fig. 1 Schematic illustration of superplastic dieless drawing process

Fig. 2 FE model of superplastic dieless drawing process

Fig. 3 Heat transfer model on tube surface in FE analysis of superplastic dieless drawing process

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (3)$$

加熱コイル外 ($z < h_z$ および $h_z + h_w \leq z$ の範囲) では以下の熱流束 q を定義し、

$$q = 0 \quad (4)$$

加熱コイル内 ($h_z \leq z < h_z + h_w$ の範囲) では以下の熱流束 q を定義した。

$$q = q_s \quad (5)$$

ここで、 h_z : 加熱コイルの z 軸方向の位置座標, h_w : 加熱コイルの幅, q_s : 供給する熱流束である。

また加熱コイルは時間 t とともに速度 V_2 で移動するため、 h_z は以下のように表される。

$$h_z = h_{z0} - V_2 t \quad (6)$$

ここで h_{z0} は初期加熱コイルの z 軸方向の位置座標である。

(b) 冷却コイル内および大気との熱伝達

チューブ表面では冷却コイルによる冷却風および大気との熱伝達が生じており、次式の境界条件が成り立つ。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_c) \quad (7)$$

ここで、 h : 熱伝達率, T_c : 雰囲気温度である。解析では冷却コイル内から冷却コイル外へ流出する冷却風を、熱伝達率が徐々に変化するものとしてモデル化した。すなわち冷却コイル外 ($z < c_z - c_e$ および $c_z + c_w + c_e \leq z$ の範囲) では以下の熱伝達率

h を定義した.

$$h = h_a \quad (8)$$

冷却コイル外に冷却風が影響する範囲 ($c_z - c_e \leq z < c_z$ および $c_z + c_w \leq z < c_z + c_w + c_e$ の範囲) では以下の熱伝達率 h を定義した

$$h = \frac{(h_c - h_a)}{c_e} \{z - (c_z - c_e)\} + h_a \quad (c_z - c_e \leq z < c_z) \quad (9)$$

$$h = \frac{(h_c - h_a)}{c_e} \{(c_z + c_w) - z\} + h_c \quad (c_z + c_w \leq z < c_z + c_w + c_e) \quad (10)$$

冷却コイル直下 ($c_z \leq z < c_z + c_w$) では以下の熱伝達率 h を定義した.

$$h = h_c \quad (11)$$

ここで, c_z : 冷却コイルの z 軸方向の位置座標, c_e : 冷却コイル外に冷却風が影響する距離, c_w : 冷却コイルの幅, h_a : 大気との熱伝達率, h_c : 冷却コイルから供給される冷却風との熱伝達率である.

また加熱コイルと同様に冷却コイルも時間 t とともに速度 V_2 で移動するため, c_z は以下のように表される.

$$c_z = c_{z0} - V_2 t \quad (12)$$

ここで c_{z0} は初期冷却コイルの z 軸方向の位置座標である.

材料の熱物性値は, 比熱 $c = 383 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 密度 $\rho = 7130 \text{ kg m}^{-3}$, 熱伝導率 $\lambda = 113 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ とした. 材料と大気との熱伝達率は $h_a = 30 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, 大気の大気温度および冷却風の温度はともに 293 K とした.

本解析では熱量 q_s や熱伝達率 h_a , h_c をある値を仮定して設定しているが, さらに高精度な解析を行う場合, 実際の熱源や冷却源に準じた熱量, 熱伝達率を設定して解析すればよい. 例えば高周波誘導加熱をモデリングする場合, 電磁場と熱の連成解析を加えることにより, 熱量を算出すればさらに高精度な解析を行うことが可能である. しかしながら, その場合, 電磁場-熱-変形のすべてを連成させる解析モデルを作成する必要があるため, モデルとして非常に複雑になる. 本報では解析を簡単にするため熱-変形連成解析のみを考慮した.

3.3 材料モデル

ダイレス引抜きは, 局所的に温度を昇温させる加工法である. 一般に高温では, 材料の変形抵抗はひずみ速度の影響を大きく受けるようになる. 特に本研究で用いた超塑性材料の場合, 変形抵抗のひずみ速度感受性は非常に顕著になる. そこで本解析で扱う材料モデルには, ひずみ硬化依存性とひずみ速度感受性を考慮した次の変形抵抗式の適用を考える.

$$\sigma = K \epsilon^n \dot{\epsilon}^m \quad (13)$$

ここで K 値は強度係数, n 値は加工硬化指数, m 値はひずみ速度感受性指数である. また, これら K , m , n 値は温度に依存する関数として近似されるものとする.

本解析で用いる材料は実験と同様に Al-78Zn 超塑性合金を想定している. この材料は室温においても, ほとんど加工硬化が起きない材料なので, 本解析ではどの温度域でも $n = 0$ とした. その他の材料特性値 K , m 値は, 温度条件が $R.T. \sim 523 \text{ K}$, ひずみ速度域が $4.17 \times 10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ で行った速度急変法の引張試験によって求め, その結果から Fig. 4 に示すような温度の関数で定義した.

3.4 ユーザーサブルーチン

上記で定義した熱伝達の境界条件および材料モデルを, 汎用有限要素法コード MSC.Marc にユーザーサブルーチンを

Fig. 4 Material properties of Al-78Zn alloy used in FEM analysis

Fig. 5 Flow chart of coupled thermo-mechanical analysis and subroutine program

利用して組み込み, Fig. 5 に示すようなひずみ速度感受性を考慮した熱-変形の連成有限要素解析を行った.

4. 解析結果及び考察

4.1 熱伝達解析の妥当性

熱伝達モデルの妥当性を検証するため, 加熱・冷却コイルを速度 $V_2 = 3.6 \text{ mm/min}$ で移動させ, 引張変形を加えずにチューブ一点の温度履歴を実験で測定した. ダイレス引抜き装置・方法については既報²⁾と同一であるため, 詳細な説明は省略する. 高周波出力は 45%と 60%に設定し, 冷却なしの場合と冷却風の圧力を 0.2 MPa に設定した場合の各条件で実験を行った.

Fig. 6 はチューブの温度履歴に及ぼす冷却コイル直下の熱伝達率の影響を示したものである. FEM 解析条件は, 供給熱量 q_s を 400 kW m^{-2} , 冷却コイル直下の熱伝達率 h_c を $0 \sim 2000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ とした. 熱伝達率 h_c を増加させるにつれて温度が全体的に低下しているのがわかる. また実験においても冷却なしの場合に比べ冷却風の圧力を 0.2 MPa に設定した場合の方が, 全体的に温度が低下しており, FEM 解析結果は実験をよくシミュレートしていると考えられる. また Fig. 7 はチューブの温度履歴に及ぼす供給熱量の影響を示したものである. FEM 解析条件は, 供給熱量 q_s を $400 \sim 1500 \text{ kW m}^{-2}$, 冷却コイル直下の熱伝達率 h_c を $2000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ とした. 供給熱量 q_s を

Fig. 6 Effect of heat transfer coefficient under cooling coil on temperature history

増加させるにつれて全体的に温度が増加しており、FEM 解析結果は実験値の傾向とよく一致している。以上の解析結果と実験値の比較から、本解析の熱伝達モデルの妥当性が示された。

4.2 変形形状に及ぼす引張速度の影響

加熱・コイル移動速度を $V_2=3.6\text{mm/min}$ に固定し、引張速度を $V_1=3.6\sim14.4\text{mm/min}$ としたときの超塑性ダイレス引抜き後の変形形状を観察した。チューブの加熱部の温度が約 523K になるように供給熱量 q_s を 1100kW m^{-2} として解析を行った。

Fig. 8 は実験および FEM 解析における各条件での変形形状外観を比較したものである。引張速度 V_1 の増加に伴い断面減少率 r が増加し、管外径 D が縮小されている。また加工初期において不安定変形が生じているのが FEM 解析結果上でも確認できる。不安定変形の度合いを不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ として次式で定義した。

$$\frac{\Delta D}{D_{ave}} = \frac{D_{ave} - D_{min}}{D_{ave}} \quad (14)$$

ここで D_{ave} : 定常状態における外径の平均値, D_{min} : 不安定変形部の最小外径である。

Fig. 9 は不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ と断面減少率 r の関係を示したものである。断面減少率 r の増加に伴い不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ は増加しているのがわかる。不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ が高いほど加工初期の非定常状態における破断の危険が高くなる。実験では $r=80\%$ を越える断面減少率を引抜くことができて破断に至っている。ここでは破断の危険度を評価する指標として不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ を用いることが妥当であると判断した。本解析は実験値とよく一致した傾向を示しており、ダイレス引抜きの定常状態に至るまでの非定常状態の挙動がよくシミュレートされていると考えられる。

4.3 変形形状に及ぼす材料特性の影響

既報²⁾にて加熱部の温度が変形形状に及ぼす影響について調査した結果、温度の適正条件で不安定変形が抑制されることがわかり、この要因として温度依存性を有する m 値の効果によるものと考察した。しかしながら、温度の変化に依存するパラメータは他にも存在し、実験では m 値をはじめとする各種材料特性の独立した影響を調査することは不可能である。そこで本解析では材料特性の中から m 値および n 値に着目し、これらの値が変形形状に及ぼす影響を調査した。解析に用いた材料特性の温度依存性を Fig. 10 に示す。 m 値は室温にお

Fig. 7 Effect of heat flux under heating coil on temperature history

Fig. 8 Effect of tensile speed, V_1 on deformation profile in superplastic dieless drawing process

Fig. 9 Relationship between ratio of instability deformation, $\Delta D/D_{ave}$ and reduction in area, r

いて 0.5, 0.7 になるような材料を仮定し、 n 値は 523K における値をすべて 0 とし、室温での値がそれぞれ 0, 0.2, 0.3, 0.4 となるような材料を仮定した。室温から 523K の間の材料特性と温度の関係は線形になるように近似した。 m 値は 523K での値を

代表値として、 n 値は室温の値を代表値として表記することにする。 K 値は Fig. 4 に示した Al-78Zn 合金と同様の値を用いた。引張速度 $V_1=3.6\text{mm/min}$ 、コイル移動速度 $V_2=3.6\text{mm/min}$ 、断面減少率にして $r=50\%$ の条件で解析を行った。

Fig. 11 は m 値が変形形状に及ぼす影響を示したものである。 m 値が 0.1 以下では不安定変形部が局所的に変形し、くびれが生じているのがわかる。 m 値が高くなるにつれて不安定変形部の発生も抑制されていくのがわかる。

Fig. 12 は不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ に及ぼす m 値と n 値の影響を示したものである。前述のように m 値の大小は、不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ に対し大きな影響を与えているのがわかる。 n 値の大小にかかわらず、全体的に m 値が高い条件では不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ が抑制されており、非定常状態で破断する可能性が低いことが示唆される。その一方で、 n 値は、 m 値が低い条件では不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ に及ぼす影響が大きいものの、 m 値が高い条件では n 値の大小が不安定変形率 $\Delta D/D_{ave}$ にほとんど影響を及ぼしていないことがわかる。

以上の結果から、ダイレス引抜きにおいては室温における n 値よりも高温における m 値の方が変形形状に大きな影響を及ぼすことがわかった。ここで非定常状態における変形は引張試験におけるくびれの発生と同じ挙動であると考えられる。つまり m 値が高い材料の場合、くびれが発生した箇所のひずみ速度が高くなるとその部位における変形抵抗が高くなり、それ以上の変形を抑制しようとする。この挙動がダイレス引抜きにおける非定常状態においても生じており、不安定変形挙動を抑制するものと考えられる。大半の材料は高温でひずみ速度感受性を示すため、解析においてひずみ速度依存指数 m 値を考慮する重要性がこの点からも示せたといえる。またダイレス引抜きにおいて、不安定変形を生じさせずに加工を成功させるためには、室温における n 値の大小にかかわらず超塑性材料のような m 値の高い材料を選択する必要があることがわかり、本研究で提案する超塑性ダイレス引抜きの有効性が本解析結果から示すことができた。逆に高温で m 値が低い材料を選択する場合は、なるべく室温における n 値の高い材料を選択することが加工を成功させる一つの解決策といえる。

5. 結 言

本研究では、ひずみ速度感受性とひずみ硬化依存性を合わせ持つ材料および熱伝達と変形を考慮した超塑性ダイレス引抜きの連成 FEM 解析モデルを作成し、その妥当性および各種条件が変形形状に及ぼす影響を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 本解析モデルの妥当性を熱伝達と変形の面から検証した。FEM 解析結果は、実験で得られた温度履歴及び変形形状とよく一致し、熱-変形連成 FEM 解析が妥当であることを示した。
- (2) 材料特性として温度依存性を考慮した m 値及び n 値が変形形状に及ぼす影響について調査した。その結果、 m 値は変形形状に大きく影響を及ぼし、 n 値は m 値が低い材料の場合のみ変形形状に影響を及ぼすことがわかった。またこの点からもダイレス引抜きにおいてひずみ速度感受性を考慮する重要性を示した。
- (3) m 値が大きな材料ほど不安定変形を抑制することがわかり、解析的にも超塑性ダイレス引抜きの有効性を示した。

Fig. 10 Temperature dependency of m and n values used in FEM analysis

Fig. 11 Effect of m value on deformation profile in dieless drawing process

Fig. 12 Effect of m and n values on instable deformation ratio $\Delta D/D_{ave}$ in dieless drawing process

参 考 文 献

- 1) 仲町英治: 機誌, 107-1023 (2004), 45.
- 2) 古島剛・真鍋健一・酒井孝: 塑性と加工, 47-548 (2006), 870-874.
- 3) 小島耕二・関口秀夫・小坂田宏造・吉川勝幸: 同上, 21-228 (1980), 52-58.
- 4) Wang, Z.T., Luan, G.F. & Bai, G.R.: J. Mater. Process. Technol., 94 (1994), 73-77.
- 5) Furushima, T., Sakai, T. & Manabe, K.: Proc. NUMIFORM, (2004), 522-527.
- 6) 小島耕二・関口秀夫・小坂田宏造・吉川勝幸: 塑性と加工, 20-224 (1979), 814-819.